

**ผลของเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันต่อการถ่ายโอนมวลสาร
สมบัติทางเคมีกายภาพ และการต้านอนุมูลอิสระของชิ้นมะม่วงที่ผ่านการออสโมซิส**
**Impact of Osmotic Dehydration Techniques on Mass Transfer,
Physicochemical and Antioxidant Properties of Osmotically Dehydrated Mango Slices**

กุลหลาบ สิทธิสวนจิก¹, สาลินี สุขเสริม, ปฏิวิทย์ ลอยพิมาย และ ทิพพัรักษ์ วงษาดี้

Kulab Sittisuanjick¹, Salinee Sukserm, Patiwit Loypimai and Thippharak Wongsadee

สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand

Received : 11 December 2024, Received in revised form : 13 February 2025, Accepted : 14 February 2025

Available online : 12 March 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้เขตร้อนมีสี กลิ่น และรสชาติเป็นเอกลักษณ์ อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เส้นใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ รวมทั้งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแคโรทีนอยด์ เป็นต้น (Gupta *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามมะม่วงมีปริมาณน้ำสูงเกิดการเน่าเสียง่ายภายหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตที่มากเกินไปเกิดความต้องการของตลาดส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยเพิ่มมูลค่าและยืดอายุการเก็บรักษา แต่วิธีอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลานานส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเตรียมขั้นต้น (pretreatment) ก่อนอบแห้ง เช่น ออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration, OD) ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ เป็นวิธีที่นำผักผลไม้ไปแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อดึงน้ำออกจากอาหาร ทำให้ปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมน้ำอิสระลดลง ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย ปรับปรุงคุณภาพทั้งทางด้านเคมีกายภาพ ทางด้านประสาทสัมผัส และยืดอายุการเก็บรักษาของผักผลไม้ แต่วิธีการดั้งเดิมใช้เวลานาน การนำเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น อัลตราซาวนด์ (ultrasound) และการแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vacuum impregnation) มาใช้ร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสารทำให้น้ำถูกกำจัดออกจากวัตถุดิบได้เร็วขึ้น รวมทั้งปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบ เนื่องจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน (cavitation) ทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้เปลี่ยนแปลง น้ำและสารประกอบต่างๆ จึงเคลื่อนที่ออกจากเนื้อเยื่อผลไม้ได้ง่ายขึ้น (Trusinska *et al.*, 2024) ขณะที่การใช้สภาวะสุญญากาศช่วยกำจัดก๊าซที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ผลไม้โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนในการแพร่กระจายของน้ำ (hydrodynamic mechanism) และเกิดการแทรกซึมของสารละลายจากภายนอกเข้าไปยังรูพรุนที่อยู่ในโครงสร้างผลไม้ (Gautam *et al.*, 2024) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเทคนิคอัลตราซาวนด์และสภาวะสุญญากาศร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันต่อการถ่ายโอนมวลสาร สมบัติทางเคมีกายภาพ และการต้านอนุมูลอิสระของชิ้นมะม่วง

วิธีดำเนินการวิจัย : เตรียมมะม่วงแก้วขมึ้นสำหรับศึกษาด้วยเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันเริ่มต้นโดยการหั่นมะม่วงตามยาว ให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อมะม่วง ทำการลวกมะม่วงในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อช่วยรักษาคุณภาพด้านสี นำชิ้นมะม่วงมาทำการศึกษากการใช้เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชัน 4 วิธี ได้แก่ เทคนิคดั้งเดิม (osmotic dehydration, OD) สภาวะสุญญากาศร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชัน (vacuum-assisted osmotic dehydration, VOD) อัลตราซาวด์ร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชัน (ultrasound-assisted osmotic dehydration, USOD) และอัลตราซาวด์ร่วมกับสภาวะสุญญากาศในการออสโมติกดีไฮเดรชัน (ultrasonic-assisted vacuum osmotic dehydration, USVOD) แช่มะม่วงในสารละลายซอร์บิทอลความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อัตราส่วนมะม่วงต่อสารละลาย 1:3 นาน 8 ชั่วโมง ศึกษาที่สภาวะสุญญากาศวางตัวอย่างในโถสุญญากาศที่ต่อเข้ากับปั๊ม (Gast model DOA-P504-BN Labmodel, Germany) ใช้ความดัน 150 มิลลิบาร์ สำหรับการเตรียมตัวอย่างด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonics Vibra-Cell VCX-500, USA) กำลัง 500 วัตต์ และความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำการวัดค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss, WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG) ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reduction, WR) ปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระในแต่ละช่วงเวลา (2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการออสโมซิสที่เวลา 8 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ค่าสี (L^* , a^* , b^* และ ΔE) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids) ค่ากรด-เบส (pH) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity) ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (total carotenoid content) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content) และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (IC_{50}) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (analysis of variance) และความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย : เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชัน ได้แก่ เทคนิค OD, VOD, USOD และ USVOD ส่งผลกระทบต่อคุณภาพมีนัยสำคัญต่อการถ่ายโอนมวลสาร คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และการต้านอนุมูลอิสระของชิ้นมะม่วง ผลการทดลองพบว่าการใช้เทคนิค USVOD มีประสิทธิภาพในการเร่งการถ่ายโอนมวลสารในกระบวนการออสโมซิส เมื่อสิ้นสุดกระบวนการชิ้นมะม่วงมีปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain) สูงสุด เท่ากับร้อยละ 68.09 และ 19.56 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระลดลงมากที่สุด เท่ากับร้อยละ 41.70 และ 0.8773 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของมะม่วงที่ผ่านการออสโมซิสที่เวลา 8 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิค USVOD ชิ้นมะม่วงมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่ากรด-เบสสูงสุด ขณะที่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ค่าความสว่างของสี (L^*) ค่าสีเขียว ($-a^*$) ค่าสีเหลือง (b^*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) มีค่าต่ำสุด นอกจากนี้การใช้เทคนิค USVOD ชิ้นมะม่วงมีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH สูงกว่าทุกเทคนิคที่ใช้ในการศึกษา

สรุปผลการวิจัย : เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสาร คุณสมบัติทางเคมีกายภาพและการต้านอนุมูลอิสระของชิ้นมะม่วง การประยุกต์ใช้เทคนิค USVOD ช่วยปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสารโดยเพิ่มปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งลดปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระของชิ้นมะม่วงได้สูงสุด นอกจากนี้ทำให้ชิ้นมะม่วงมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่ากรด-เบส ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด แต่มีค่า ΔE ต่ำสุด สรุปได้ว่าการใช้เทคนิค USVOD เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถประยุกต์ใช้ในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งเชิงพาณิชย์ ช่วยลดการใช้พลังงาน ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต พร้อมทั้งคงคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ : มะม่วง ; ออสโมติกดีไฮเดรชัน ; อัลตราซาวนด์ ; การแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Abstract

Background and Objectives : Mango (*Mangifera indica* L.) is a tropical fruit with a unique color, aroma, and taste. It is rich in nutrients that benefit health, including carbohydrates, proteins, dietary fiber, vitamins, and minerals. Additionally, it contains important bioactive compounds such as phenolic acids, flavonoids, and carotenoids (Gupta *et al.*, 2022). However, mangoes have a high moisture content, making them highly perishable after harvest. Excess mango production beyond market demand impacts production costs. Processing mangoes into dried fruit products is an alternative that adds value and extends shelf life. Nevertheless, hot-air drying methods have the drawback of being time-consuming, which negatively affects the product quality. The pretreatment method of mangoes before drying, such as osmotic dehydration, can reduce drying time. Osmotic dehydration is a method that involves soaking fruits or vegetables in a solution to remove water from them. This process reduces moisture content and water activity (a_w), which inhibits the growth of microorganisms responsible for food spoilage. It also improves the physicochemical and sensory qualities, as well as extends the shelf life of fruits and vegetables. However, conventional osmotic dehydration methods take a long time. The application of non-thermal and environmentally friendly technologies, such as ultrasound and vacuum impregnation combined with osmotic dehydration, can enhance mass transfer efficiency, allowing water to be removed from the raw material more quickly while also improving the quality of the food material. The ultrasound technique induces cavitation, leading to microstructural changes in fruit tissue, which facilitates the movement of water and solutes (Trusinska *et al.*, 2024). Meanwhile, vacuum conditions help eliminate gases in the intercellular spaces using a hydrodynamic mechanism, allowing solutions to impregnate the pores of the plant structure (Gautam *et al.*, 2024). Thus, this study aims to investigate

the effects of ultrasound and vacuum combined with osmotic dehydration on mass transfer, physicochemical properties, and antioxidant activity in mango slices.

Methodology : The preparation of Kaew Kamin mango for the osmotic dehydration study begins with slicing the mango lengthwise into pieces approximately 1 cm thick. The mango slices were soaked in a 0.5% calcium chloride solution to enhance firmness and then blanched in boiling water at 100°C for 30 seconds to help preserve color quality. Mango slices were pretreated using four osmotic dehydration techniques: traditional osmotic dehydration (OD), vacuum-assisted osmotic dehydration (VOD), ultrasound-assisted osmotic dehydration (USOD), and ultrasonic-assisted vacuum osmotic dehydration (USVOD). The mango slices were soaked in 60° Brix sorbitol solution at 1:3 mango to solution ratio for 8 hours. The study was conducted under vacuum conditions in a vacuum chamber with a pump (Gast model DOA-P504-BN Labmodel, Germany) at 150 mbar. For ultrasound pretreatment, a high-intensity ultrasonic processor (Sonics Vibra-Cell VCX-500, USA) with 500 watts and 20 kHz was used. Water loss (WL), solid gain (SG), weight reduction (WR), moisture content, and water activity were measured at various time intervals (2, 4, 6, and 8 hours). At the end of the osmotic dehydration process (after 8 hours), color (L^* , a^* , b^* , and ΔE), total soluble solids, pH, titratable acidity, total carotenoid content, total phenolic content, and antioxidant activity (using the DPPH method) were analyzed. The experiment was conducted using a completely randomized design (CRD). The experimental data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), and significant differences between mean value of treatments were determined using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level with SPSS for Windows. All experiments were repeated three times.

Main Results : The osmotic dehydration techniques, including OD, VOD, USOD, and USVOD significantly affected the mass transfer parameters, physicochemical and antioxidant properties of osmotically dehydrated mango slices. The experimental results showed that the USVOD technique effectively accelerated mass transfer in the osmosis process. At the end of the process, the mango slices exhibited the highest water loss and solid gain, reaching 68.09% and 19.56%, respectively. Meanwhile, the moisture content and water activity showed the greatest reduction, with values of 41.70% and 0.8773, respectively, when compared to other techniques. The study on the physicochemical properties of osmotically dehydrated mango after 8 hours revealed that the use of the USVOD technique resulted in the highest total soluble solids and pH values. Whereas the titratable acidity, lightness (L), greenness ($-a$), yellowness (b^*), and color difference (ΔE) were at their lowest. Additionally, the USVOD technique resulted in higher total carotenoid content, total phenolic content, and DPPH radical scavenging activity, compared to all other techniques used in the study.

Conclusions : Osmotic dehydration techniques affect the quality of osmotically dehydrated mango slices in terms of mass transfer, physicochemical and antioxidant properties. The application of the USVOD technique improves mass transfer efficiency by increasing water loss and solid gain, while reducing moisture content and water activity to the maximum. Additionally, mango slices pretreated with the USVOD technique resulted in the highest total soluble solid content, pH values, antioxidant activity, and bioactive compounds, including total carotenoid content and total phenolic compounds, while exhibiting the lowest ΔE value. It can be concluded that the USVOD technique is a non-thermal and environmentally friendly technology that can be applied to raw material preparation to enhance efficiency in commercial drying processes. It reduces energy consumption, processing time, and production costs while preserving the nutritional value of the products.

Keywords : mango ; osmotic dehydration ; ultrasound ; vacuum impregnation

*Corresponding author. E-mail : kulab.sj@gmail.com

Introduction

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมทั่วโลกเนื่องจากมีสี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compounds) หลายชนิด เช่น กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ คาเทชิน แครโทีนอยด์ โทโคฟีรอล และแซนโทนอยด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารอาหารหลักและสารอาหารรองที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เส้นใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ (Gupta *et al.*, 2022) แต่มะม่วงมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงเกิดการเน่าเสียได้ง่าย การนำมะม่วงมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จึงเป็นทางเลือกในการยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น เช่น วิธีการอบแห้งใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงให้มีมูลค่าเพิ่มได้ อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมด้วยลมร้อนใช้เวลานานส่งผลต่อคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ คุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งความสามารถในการดูดคืนน้ำ (rehydration) ของผลไม้อบแห้ง การลดระยะเวลาในการอบแห้งทำได้โดยใช้การเตรียมขั้นต้น (pretreatment) วัตถุประสงค์ เช่น ออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration) เพื่อกำจัดน้ำบางส่วนของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว

ออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration, OD) เป็นเทคนิคการถนอมอาหารที่นิยมใช้เพื่อลดการเน่าเสียของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผักผลไม้ได้ทุกฤดูกาล ช่วยปรับปรุงคุณภาพทางเคมีกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้ นิยมใช้เตรียมวัตถุดิบขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การอบแห้งและการแช่เยือกแข็ง ในกระบวนการออสโมซิส แรงดันออสโมซิสทำให้น้ำและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำภายในเซลล์อาหารเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกเซลล์ ขณะที่สารละลายที่อยู่ภายนอกเซลล์เคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างระหว่างเซลล์ส่งผลให้วัตถุดิบผักผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทั้งทางด้านเคมีและกายภาพ โดยมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เทคนิคและสภาวะที่ใช้ ชนิด

และความเข้มข้นของสารละลาย ขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และสายพันธุ์ของวัตถุดิบ เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการออสโมซิส ใช้เวลานาน มักเป็นข้อจำกัดในการแปรรูปอาหารในเชิงพาณิชย์ มีเทคนิคต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสาร และลดเวลาในกระบวนการออสโมซิส เช่น การแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vacuum impregnation) การแทรกซึมสุญญากาศแบบพัลส์ (pulsed-vacuum) การใช้ความดันสูง (high pressure) การปั่นเหวี่ยง (centrifugation) และอัลตราซาวนด์ (ultrasound) เป็นต้น มีรายงานว่า การใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์ และสภาวะสุญญากาศในการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ทำให้ปริมาณน้ำในอาหารถูกกำจัดออกได้มากขึ้น ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง ปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้ง (Sharma & Dash, 2019)

อัลตราซาวนด์ (ultrasound, US) เป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ความร้อนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีใหม่นี้ใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 16 kHz ถึง 100 MHz ก่อให้เกิดการบีบอัดและการขยายตัวของระบบ เกิดโพรงอากาศ (cavitation) ทำให้เซลล์ของผักผลไม้เปลี่ยนแปลง มีรายงานถึงการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสารในผักและผลไม้ เช่น บร็อคโคลี่ แครนเบอร์รี่ กีวี และสับปะรด (Sharma & Dash, 2019) การแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vacuum impregnation, VI) เป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ความร้อน อาศัยหลักการทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศในโครงสร้างของผักผลไม้ อากาศถูกดึงออกจากเนื้อเยื่อผักผลไม้ เมื่อปล่อยให้ระบบกลับสู่สภาวะความดันบรรยากาศปกติของเหลวหรือสารละลายที่อยู่รอบชิ้นอาหารมีการแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อแทนที่อากาศทางช่องว่างระหว่างเซลล์ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น การใช้สภาวะสุญญากาศส่งผลต่อโครงสร้างแคปิลลารี (capillary structure) ของอาหาร ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารแบบสองทิศทางระหว่างโครงสร้างอาหารและสารละลาย โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนในการแพร่กระจายของน้ำ (hydrodynamic mechanism, HDM) มีรายงานถึงการใช้สภาวะสุญญากาศในกระบวนการออสโมซิสช่วยปรับปรุงกระบวนการอบแห้งแตงโม (Ferrari *et al.*, 2011) แอปเปิล (Atarés *et al.*, 2008) และฝรั่ง (Corrêa *et al.*, 2010) เมื่อใช้ในการเตรียมชิ้นต้นมะม่วงก่อนทำการอบแห้ง สามารถรักษาการคงอยู่ของสารแคโรทีนอยด์ สารฟีนอลิกและกรดแอสคอร์บิกในมะม่วงอบแห้งไว้ได้ (de Medeiros *et al.*, 2022)

Methodology

1. การเตรียมตัวอย่าง

1) การเตรียมตัวอย่าง (sample preparation)

นำมะม่วงแก้วขมิ้นแก่ที่ผ่านการทำความสะอาด ปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นตามความยาวหนา 1 เซนติเมตร แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เพื่อรักษาเนื้อสัมผัสก่อนทำการลวกในน้ำเดือด อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

2) กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration process)

ชั่งน้ำหนักชิ้นมะม่วง 200 กรัม ที่เตรียมไว้ในข้อ 1) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แช่ในสารละลายซอร์บิทอลความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ (°Brix) ที่อัตราส่วน 1 : 3 ดัดแปลงวิธีการของ Naknean *et al.* (2013) การศึกษา

ที่สภาวะสุญญากาศนำปีกเกอร์บรรจุตัวอย่างวางในโถดูดความชื้น (Vacuum desiccator, PolyLab® , Thailand) ที่ต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ (Gast-model DOA-P504-BN Labmodel, Germany) ใช้ความดัน 150 มิลลิบาร์ (mbar) สำหรับการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงชนิดโพรบ (Sonics Vibra-Cell VCX-500, USA) พลังงาน 500 วัตต์ (watts) และความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) เวลาที่ทำการศึกษาในแต่ละสิ่งทดลอง แสดงดัง Table 1 จากนั้นแช่ตัวอย่างต่อในสภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ทำการสะเด็ดน้ำออกจากชิ้นมะม่วงก่อนนำไปวิเคราะห์การถ่ายโอนมวลสารทุก 2 ชั่วโมง สำหรับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และการต้านอนุมูลอิสระ ศึกษาที่เวลา 8 ชั่วโมง

Table 1 Description of the osmotic dehydration processes.

Treatment	Time (min)	
	Vacuum (150 mbar)	Ultrasound (amplitude 40%)
OD	-	-
VOD	20	-
USOD	-	20
USVOD	10	10

Osmotic dehydration (OD), Vacuum-assisted osmotic dehydration (VOD), Ultrasound-assisted osmotic dehydration (USOD), and Ultrasonic-assisted vacuum osmotic dehydration (USVOD) treatment.

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติในการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfers)

การคำนวณปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss, WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reduction, WR) ดัดแปลงวิธีการของ Li *et al.* (2019)

$$WL = \frac{W_{w0} - W_w}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

$$SG = \frac{W_s - W_{s0}}{W_o} \times 100 \quad (2)$$

$$WR = \frac{W_o - W}{W_o} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม), W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง ณ เวลา t (กรัม), W_{w0} คือ ปริมาณน้ำในตัวอย่าง (กรัม), W_w คือ ปริมาณน้ำในตัวอย่าง ณ เวลา t (กรัม), W_{s0} คือ น้ำหนักของแข็งในตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม), W_s คือ น้ำหนักของแข็งในตัวอย่าง ณ เวลา t (กรัม)

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

1) ค่าสี วัดด้วยเครื่อง Chroma Meter (CR-400 – Konica Minolta Color) รายงานผลเป็นค่า L^* , a^* , b^* และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ดัดแปลงวิธีการของ Radziejewska-Kubzdela *et al.* (2023)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad (4)$$

โดย L^* คือ ค่าความสว่างของสี, a^* คือ สีแดง-เขียว, b^* คือ สีเหลือง-น้ำเงิน, 0 แทน ตัวอย่างควบคุม (Untreated) และ i แทน ตัวอย่างที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเทคนิคต่างๆ

2) ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

อบตัวอย่างในตู้อบ (MEMMERT™ Universal Oven, Model UN55) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้น และรายงานผลเป็นร้อยละ ดังสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

W_1 แทน น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ และ W_2 แทน น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

3) กิจกรรมน้ำอิสระ (water activity) ใช้เครื่องวัดค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (Water activity meter, AQUALAB CX3)

4. การวิเคราะห์คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ

1) กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

1.1) การเตรียมสารสกัด ดัดแปลงวิธีการของ Loypimai *et al.* (2009)

สกัดตัวอย่างน้ำหนัก 24 กรัม ด้วยเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (JSR, Model JSSB-30T) นาน 4 ชั่วโมง กรองสารสกัดและเก็บที่อุณหภูมิตู้เย็นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

1.2) วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวม (total phenolic compounds) ดัดแปลงวิธีการของ Loypimai *et al.* (2010)

นำสารสกัดปริมาตร 200 ไมโครลิตร จากข้อ 1.1) มาเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ปริมาตร 800 ไมโครลิตร และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วย

นำกลั่นให้ครบ 7.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เก็บในที่มืดนาน 2 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Thermo Scientific GENESYS 10S Series) คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง (mg GAE/ 100 g dry sample)

1.3) วิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH radical scavenging assay ดัดแปลงวิธีการของ Loypimai *et al.* (2010)

นำสารสกัดปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากข้อ 1.1) เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เก็บในที่มืดนาน 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Thermo Scientific GENESYS 10S Series) คำนวณฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ดังสมการ

$$\text{Inhibition activity (\%)} = \frac{A_0 - A_e}{A_0} \times 100 \quad (6)$$

โดย A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (ไม่เติมสารสกัด)

A_e คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระรายงานเป็นค่า IC_{50} แสดงถึงปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำให้อนุมูล DPPH ลดลงร้อยละ 50 หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL) คำนวณค่าจากสมการของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Inhibition activity กับความเข้มข้นของสารสกัด

2) การวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ (carotenoids content) ดัดแปลงวิธีของ Lee & Castle (2001)

นำมะม่วงที่ผ่านการบดเป็นเนื้อเดียวกันปริมาณ 2 กรัม เติมสารละลายที่มีส่วนผสมของเฮกเซน แอซีโตน และเอทานอล ที่อัตราส่วน 2:1:1 ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ที่เติม butylated hydroxyl toluene (BHT) ร้อยละ 0.05 นำส่วนผสมไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการแยกชั้นของเฮกเซนออก แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 450 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Thermo Scientific GENESYS 10S Series) รายงานผลในหน่วยไมโครกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง ($\mu\text{g} / 100 \text{ g dry sample}$)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (analysis of variance) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสิ่งทดลองใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows

Results

1. การถ่ายโอนมวลสารของชิ้นมะม่วงระหว่างกระบวนการออสโมซิส

การถ่ายโอนมวลสารของชิ้นมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสด้วยเทคนิคต่างกัน ได้แก่ เทคนิค OD, VOD, USOD และ USVOD ในแต่ละช่วงเวลาที่ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พบว่าการใช้เทคนิค USVOD มีค่า WL และ SG สูงทุกช่วงเวลา มีค่าระหว่างร้อยละ 61.28-68.09 และร้อยละ 15.37-19.56 ตามลำดับ ขณะที่ค่า WR ของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่าการศึกษาโดยใช้เทคนิค USVOD มีค่า WR สูงสุด เท่ากับร้อยละ 45.91 และ 47.96 ตามลำดับ แต่มีค่าต่ำสุดที่เวลา 6 และ 8 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 48.07 และ 48.53 ตามลำดับ (Figure 1)

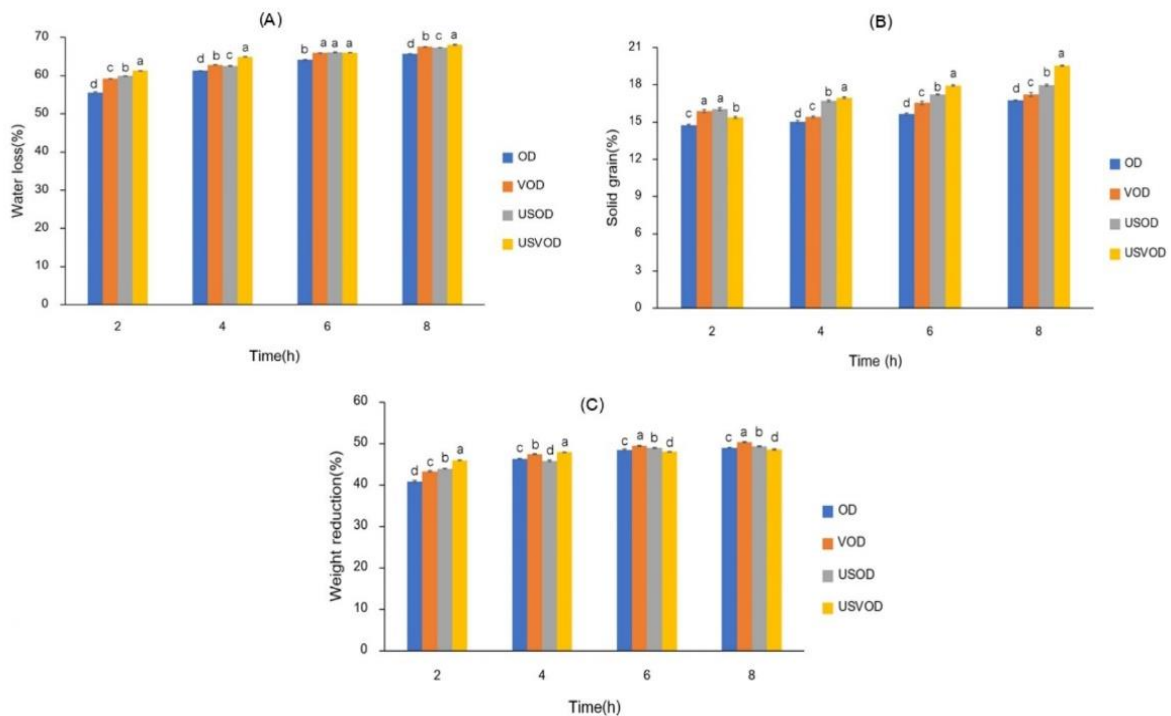


Figure 1 (A) Water loss (WL); (B) Solid gain (SG); (C) Weight reduction (WR) of osmotically dehydrated mango slices during osmotic dehydration at different methods and time. Values are mean \pm standard deviation; the different letters above the bars in each time indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

2. ปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระ (water activity) ของชิ้นมะม่วงระหว่างกระบวนการออสโมซิส

ปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระของชิ้นมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสด้วยเทคนิคต่างกันในแต่ละช่วงเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มเวลาในการออสโมซิส พบว่าปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระของทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง ขณะที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการออสโมซิสมะม่วงที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค USVOD มีปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระต่ำสุด เท่ากับร้อยละ 41.70 และ 0.8773 ตามลำดับ รองลงมา คือ การใช้เทคนิค USOD, VOD และ OD ตามลำดับ (Figure 2)

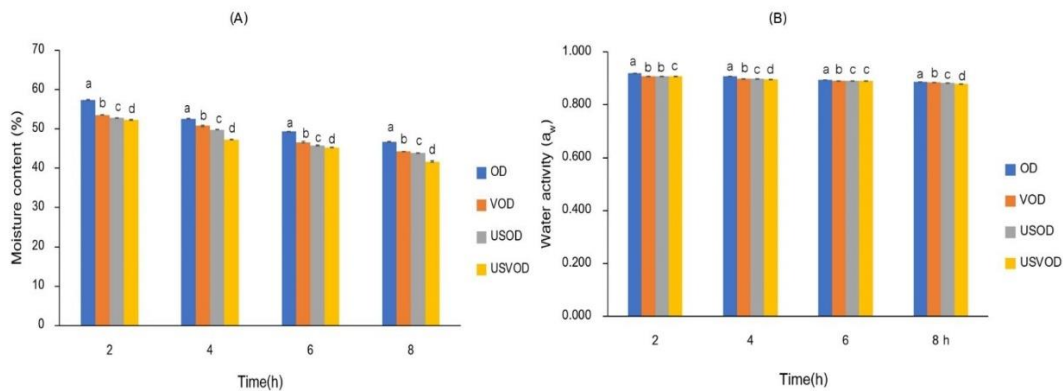


Figure 2 (A) Moisture content; (B) Water activity (a_w) of osmotically dehydrated mango slices during osmotic dehydration at different methods in each time. Values are mean \pm standard deviation; the different letters above the bars in each time indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

3. คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของชิ้นมะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

1) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids) ค่ากรด-เบส (pH) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity)

จากการศึกษา พบว่าเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันส่งผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids) ค่ากรด-เบส (pH) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity) ของชิ้นมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทุกสิ่งทดลองมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่ากรด-เบสเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม (Untreated) การใช้เทคนิค USVOD ส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่ากรด-เบสสูงสุด เท่ากับ 9.53 องศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) และ 4.17 ตามลำดับ รองลงมา คือ การใช้เทคนิค USOD, VOD และ OD ตามลำดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 8.10-8.57 องศาบริกซ์ และ 3.83-3.91 ตามลำดับ ขณะที่การใช้เทคนิค OD มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้สูงสุด เท่ากับร้อยละ 1.00 รองลงมา คือ การใช้เทคนิค VOD, USOD และ USVOD ตามลำดับ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.57- 0.83 (Table 2)

2) ค่าสี

จากการศึกษา พบว่าเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันส่งผลให้ค่าความสว่างของสี (L^*) ค่าสีแดง-เขียว ($+a^*$ และ $-a^*$) ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ($+b^*$ และ $-b^*$) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของชิ้นมะม่วงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทุกสิ่งทดลองมีค่าความสว่างของสีลดลง และสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม (Untreated) (Table 3 และ Figure 3) และทุกสิ่งทดลองค่า a^* ติดลบ บ่งบอกค่าความเป็นสีเขียว เมื่อพิจารณาเฉพาะสิ่งทดลองที่ผ่านกระบวนการออสโมซิส การใช้เทคนิค OD ชิ้นมะม่วงมีค่าความสว่างของสี และค่าสีเหลืองสูงสุด เท่ากับ 75.29 และ 68.93 ตามลำดับ สำหรับการใช้น้เทคนิค USVOD มีค่าความเป็นสีเขียว และค่า ΔE ต่ำสุด เท่ากับ -0.33 และ 17.71 ตามลำดับ

Table 2 Total soluble solids, pH and titratable acidity of osmotically dehydrated mango slices using osmotic dehydration combined with different methods.

Treatments	Parameters		
	Total soluble solids ($^{\circ}$ Brix)	pH	Titratable acidity (%)
Untreated	3.00 ± 0.00^d	3.53 ± 0.02^e	1.87 ± 0.06^a
OD	8.10 ± 0.10^c	3.83 ± 0.01^d	1.00 ± 0.10^b
VOD	8.53 ± 0.06^b	3.86 ± 0.01^c	0.83 ± 0.06^c
USOD	8.57 ± 0.06^b	3.91 ± 0.00^b	0.83 ± 0.06^c
USVOD	9.53 ± 0.06^a	4.17 ± 0.01^a	0.57 ± 0.06^d

*Note : ^{a-e} Means \pm standard deviation followed of different letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 3 Color parameters of osmotically dehydrated mango slices using osmotic dehydration combined with different methods.

Treatments	Color parameters			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
Untreated	80.62 ± 0.10^a	-4.33 ± 0.02^e	51.81 ± 0.07^e	-
OD	75.29 ± 0.09^b	-1.74 ± 0.02^d	68.93 ± 0.04^a	17.82 ± 0.06^c
VOD	72.86 ± 0.06^c	-0.62 ± 0.01^c	68.74 ± 0.07^b	19.01 ± 0.04^b
USOD	72.80 ± 0.06^c	-0.57 ± 0.01^b	68.61 ± 0.04^c	19.18 ± 0.06^a
USVOD	71.22 ± 0.04^d	-0.33 ± 0.01^a	66.27 ± 0.04^d	17.71 ± 0.02^d

*Note : ^{a-e} Means \pm standard deviation followed of different letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

L^* : brightness, a^* : red-green chromaticity, b^* : yellow- blue chromaticity.

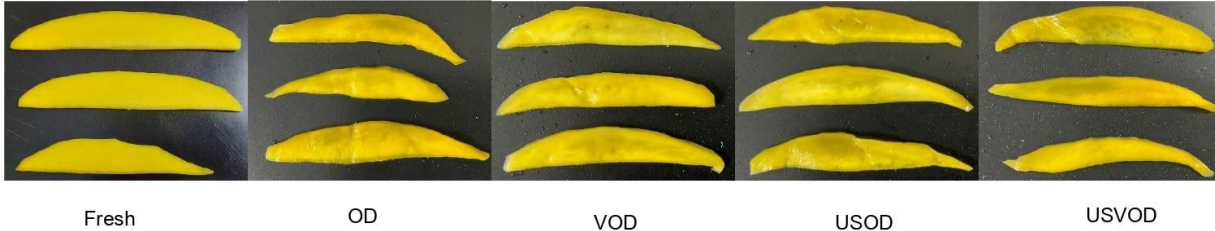


Figure 3 Osmotically dehydrated mango slices after osmotic dehydration process with different methods.

4. คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

จากการศึกษา พบว่าเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันส่งผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (IC_{50}) ของชิ้นมะม่วงมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระทุกพารามิเตอร์ของชิ้นมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม (Untreated) การใช้เทคนิค USVOD มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (ค่า IC_{50} ต่ำ แสดงถึงการมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่สูง) สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ มีค่าเท่ากับ $276.41 \mu\text{g} / 100 \text{ g dry sample}$, $51.14 \text{ mg GAE} / 100 \text{ g dry sample}$ และ 0.313 mg/mL ตามลำดับ รองลงมาคือ การใช้เทคนิค VOD, USOD และ OD มีค่าอยู่ระหว่าง $198.00\text{-}266.65 \mu\text{g} / 100 \text{ g dry sample}$, $36.80\text{-}43.17 \text{ mg GAE} / 100 \text{ g dry sample}$ และ $0.366\text{-}0.480 \text{ mg/mL}$ ตามลำดับ (Table 4)

Table 4 Antioxidant properties of osmotically dehydrated mango slices using osmotic dehydration combined with different methods.

Treatments	Parameters		
	Total carotenoid content ($\mu\text{g} / 100 \text{ g dry sample}$)	Total phenolic compound ($\text{mg GAE} / 100 \text{ g dry sample}$)	IC_{50} (mg / mL)
Untreated	$1,007.01 \pm 1.55^a$	110.79 ± 0.23^a	0.300 ± 0.001^e
OD	198.00 ± 0.60^e	36.80 ± 0.03^e	0.480 ± 0.001^a
VOD	266.65 ± 1.10^c	43.17 ± 0.03^c	0.366 ± 0.001^c
USOD	230.64 ± 0.94^d	40.75 ± 0.03^d	0.372 ± 0.001^b
USVOD	276.41 ± 1.77^b	51.14 ± 0.06^b	0.313 ± 0.001^d

*Note : ^{a-e} Means \pm standard deviation followed of different letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Discussion

1. การถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการออสโมซิส

การใช้เทคนิค USVOD มีปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG) ทุกช่วงเวลาที่สูง มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 61.28 - 68.09 และร้อยละ 15.37-19.56 ตามลำดับ ค่า WL ที่ได้จากการศึกษามีค่าสูงกว่าที่พบในรายงานวิจัยของ Fernandes *et al.* (2019) ทำการศึกษาการใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์ในการออสโมซิสมะม่วง ที่เวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่ามีค่า WL อยู่ระหว่างร้อยละ 0.4 - 20.6 ขณะที่ค่า SG มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.7 - 64.9 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาที่เวลา 180 นาที มีรายงานวิจัยของ Sulistyawati *et al.* (2018) ศึกษาการใช้เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันด้วยวิธีดั้งเดิม และการใช้สภาวะสูญญากาศร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันในการออสโมซิสมะม่วงสุก พบว่ามีค่า WL เท่ากับร้อยละ 44.91 และ 46.09 ตามลำดับ ขณะที่ค่า SG เท่ากับร้อยละ 4.95 และ 6.54 ตามลำดับ การที่ค่า WL และ SG ในกระบวนการออสโมซิสมะม่วงแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาอาจเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างระดับการสุก สายพันธุ์มะม่วง ชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย รวมทั้งเทคนิคและสภาวะที่ใช้ทดลอง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันช่วยปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสารของผลไม้ เช่น แอปเปิล (Ma *et al.*, 2021) มะม่วง (Fernandes *et al.*, 2019; Sulistyawati *et al.*, 2018) และแครนเบอร์รี่ (Nowacka *et al.*, 2017) โดยมีค่า WL และ SG สูงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการออสโมซิส ขณะที่ Sharma and Dash (2019) พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำของลูกหว่าที่ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค USVOD มีค่าสูงกว่าการใช้เทคนิค VOD และ OD การใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ช่วยให้การถ่ายโอนมวลสารในกระบวนการออสโมซิสเร็วขึ้น เนื่องจากคลื่นอัลตราซาวนด์เคลื่อนที่ผ่านของเหลวทำให้อนุภาคของของเหลวเกิดการสั่น เกิดการบีบอัด (compression) และการคลายตัว (rarefaction) ของคลื่นอัลตราซาวนด์สลับกันส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันภายในโครงสร้างผลไม้ เมื่อความดันลดลง (rarefaction phase) จะเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก (microbubbles) ภายในของเหลว เรียกว่า ปรากฏการณ์คาวิเทชัน (cavitation) ฟองอากาศเหล่านี้มักเกิดในรูพรุนหรือผิวของผลไม้ที่ไม่เรียบ ขณะที่ช่วงความดันเพิ่มขึ้น (compression phase) ฟองอากาศเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว (Rana *et al.*, 2024) มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในโครงสร้างของผลไม้ เกิดแรงเฉือน (shear forces) ทำให้เซลล์ผลไม้แตก (cell lysis) และโครงสร้างเซลล์ถูกทำลาย (Xu *et al.*, 2014) นอกจากนี้เพกติน (pectin) ที่อยู่บริเวณผนังเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ (middle lamella) ผลไม้เกิดการละลาย การยึดเกาะกันระหว่างเซลล์ลดลง นำไปสู่การเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular spaces) เมื่อเวลาผ่านไปเซลล์เกิดการแตกตัวและแยกออกจากกันจนเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (microchannels) ทำให้ของแข็งสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในโครงสร้างผลไม้ได้ รวมทั้งอัตราส่วนของสารละลายต่อปริมาณน้ำในแวคิวโอล (vacuole) เพิ่มขึ้น น้ำจะเคลื่อนที่จากแวคิวโอลไปยังผนังเซลล์ และออกสู่สารละลายออสโมติก (osmotic solution) ที่อยู่รอบชั้นผลไม้ (Goula *et al.*, 2017) ขณะที่การใช้เทคนิคสูญญากาศช่วยเร่งการกำจัดน้ำออกจากชั้นผลไม้ เมื่อแช่ชั้นผลไม้ที่สภาวะสูญญากาศ ก๊าซที่อยู่ช่องว่างระหว่างเซลล์ภายในโครงสร้างผลไม้ถูกดึงออกอาศัยกลไก Hydrodynamic mechanism (HDM) หรือแรงขับเคลื่อนในการแพร่กระจายของน้ำ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงความดันภายใน

และภายนอกชั้นผลไม้ ทำให้สารละลายที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์เคลื่อนที่ออกสู่สารละลายที่ใช้ในการแช่ เมื่อทำให้ระบบกลับสู่สภาวะบรรยากาศปกติ เกิดการแพร่ของสารละลายเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเซลล์แทนที่ก๊าซที่ถูกดึงออกไป (Gautam *et al.*, 2024) การใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ในการเตรียมขั้นต้นก่อนใช้สภาวะสุญญากาศช่วยให้การกำจัดอากาศและน้ำอิสระออกจากเนื้อเยื่อผลไม้ได้มากขึ้นโดยเพิ่มรูพรุนของวัตถุดิบ (Trusinska *et al.*, 2024) ดังนั้นการใช้ทั้งสองเทคนิคร่วมกันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสารในกระบวนการออสโมซิส สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reduction, WR) ของกระบวนการออสโมซิสเกี่ยวข้องกับค่าการสูญเสีย น้ำ (water loss) และส่วนประกอบของอาหารที่ละลายน้ำได้ จากการศึกษาค่า WR ของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสด้วยเทคนิค USVOD ที่เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่าสูงสุดแต่มีค่าต่ำสุดที่เวลา 6 และ 8 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการออสโมซิส น้ำภายในเซลล์เนื้อเยื่ออาหารถูกดึงออกมาอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากปรากฏการณ์คาวีเทชัน กลไก HDM และความแตกต่างของความเข้มข้นของของเหลวภายในเซลล์และสารละลายออสโมติก การสูญเสีย น้ำในปริมาณมาก น้ำหนักของอาหารจะลดลงทำให้ค่า WR เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป การสูญเสีย น้ำจะลดลงเนื่องจากเกิดสมดุลในการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer equilibrium) รวมทั้งสารละลายออสโมติกบางส่วนเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อเยื่อของอาหารเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การลดลงของน้ำหนักอาหารเกิดการชะลอตัวหรือมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อเยื่อจากการสูญเสีย น้ำมากเกินไปอาจทำให้การเคลื่อนที่ของของเหลวช้าลง ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยจึงสรุปได้ว่าการใช้เทคนิค USVOD ในกระบวนการออสโมซิสขึ้นมะม่วง ค่า WR เพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากเนื้อเยื่อของมะม่วงเกิดการสูญเสีย น้ำ จากนั้นมีค่าลดลงเมื่อเกิดสภาวะสมดุลในการถ่ายโอนมวล มีการแทรกซึมของของแข็งจากสารละลายออสโมติกเข้าสู่ตัวอย่างอาหารมากขึ้น นอกจากนี้มีรายงานวิจัยของ Sulistyawati *et al.* (2018) พบว่าการใช้เทคนิค VOD ในการเตรียมขั้นต้นมะม่วงดิบ มีค่า WR ต่ำกว่าการใช้เทคนิค OD มีค่าเท่ากับร้อยละ 31 และ 50.74 ตามลำดับ ขณะที่มะม่วงสุกการใช้ทั้งสองเทคนิคมีค่า WR ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ มีค่าเท่ากับร้อยละ 46.09 และ 44.91 ตามลำดับ ดังนั้นการถ่ายโอนมวลสารในกระบวนการออสโมซิสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เทคนิคและสภาวะที่ใช้ในการศึกษา ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายออสโมติก ชนิด ขนาด รูปร่าง โครงสร้างเซลล์ และสายพันธุ์ของวัตถุดิบ เวลาที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารละลาย เป็นต้น

2. ปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระ (water activity) ระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน

ปริมาณความชื้นและกิจกรรมของน้ำอิสระมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ทุกสิ่งทุกอย่างเมื่อเพิ่มเวลาในกระบวนการออสโมซิสมีปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระลดลง การศึกษาโดยใช้เทคนิค USVOD ขึ้นมะม่วงมีปริมาณความชื้นและกิจกรรมน้ำอิสระลดลงมากกว่าทุกเทคนิคเมื่อสิ้นสุดกระบวนการออสโมซิส มีค่าเท่ากับร้อยละ 41.70 และ 0.8773 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์เกิดการบีบอัดและการขยายตัวของฟองอากาศสลับกันภายในชั้นมะม่วง ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กภายในโครงสร้างและน้ำเคลื่อนที่ออกจากเซลล์มะม่วงได้ง่ายขึ้น เมื่อใช้สภาวะสุญญากาศร่วมด้วยช่วยกำจัดอากาศที่อยู่ในรูพรุนภายในโครงสร้างและน้ำจากเนื้อเยื่อผลไม้ได้มากขึ้น (Trusinska *et al.*, 2024) ดังรายงานวิจัยของ Zou *et al.* (2013) พบว่ามะม่วงที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยวิธีการออสโมซิสใช้เวลา 30, 60 และ 120 นาที มีปริมาณความชื้น เท่ากับร้อยละ 80.7, 78.6 และ 74.9 ตามลำดับ ขณะที่กิจกรรม

น้ำอิสระ มีค่าเท่ากับ 0.925, 0.913 และ 0.894 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่กล่าวมาในข้างต้น พบว่าการใช้เทคนิค USVOD สามารถกำจัดน้ำ และลดปริมาณน้ำอิสระได้มากกว่า การใช้เทคนิค USVOD ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นจะลดลงมาก แต่กิจกรรมน้ำอิสระยังมีค่าที่สูง ทั้งนี้อาจเกิดจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กภายในเซลล์ผลไม้ส่งผลให้น้ำเคลื่อนที่ออกมาภายนอกเซลล์ได้มาก ขณะเดียวกันสารละลายที่ใช้ในการแช่ชิ้นผลไม้สามารถแทรกกลับเข้าไปภายในโครงสร้างผลไม้ได้มากเช่นกันจึงทำให้กิจกรรมน้ำอิสระมีค่าที่สูง (Fernandes *et al.*, 2009) ดังนั้นปริมาณความชื้น และกิจกรรมน้ำอิสระของผลไม้ที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น เทคนิคและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิส ขนาด รูปร่าง โครงสร้างเซลล์ และสายพันธุ์ของวัตถุดิบ ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารละลาย เป็นต้น เมื่อพิจารณาจากกิจกรรมน้ำอิสระของชิ้นมะม่วงที่ใช้เทคนิค USVOD พบว่ามีค่ามากกว่า 0.85 ไม่อยู่ในกลุ่มของอาหารกึ่งแห้ง จึงเหมาะสำหรับนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง เนื่องจากน้ำถูกกำจัดออกจากวัตถุดิบบางส่วนช่วยลดระยะเวลาในการแปรรูปและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

3. คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของมะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของมะม่วงที่ผ่านการออสโมซิสเกี่ยวข้องกับปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain) เนื่องจากตัวถูกละลาย (solute) ที่อยู่ในสารละลายออสโมติกเคลื่อนที่เข้าไปในโครงสร้างของมะม่วง การใช้เทคนิค USVOD มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่ากรด-เบสสูงสุด แต่มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ทั้งหมดต่ำ เป็นผลมาจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้น้ำเชื่อมเยื่อผลไม้ถูกทำลาย และเมื่อมีการใช้สภาวะสุญญากาศเป็นระยะเวลาหนึ่งร่วมด้วยมีการดึงอากาศออกจากรูพรุนของผลไม้ได้มากขึ้นทำให้น้ำ และสารประกอบอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ที่อยู่ภายในโครงสร้างเคลื่อนที่ออกมาภายนอกโครงสร้างผลไม้ ขณะเดียวกันสารละลายจากภายนอกแพร่เข้าไปยังช่องว่างระหว่างเซลล์ของผลไม้แทน สำหรับการใช้น้ำ OD การเคลื่อนที่ของสารที่อยู่ภายในและภายนอกเซลล์ผลไม้เป็นผลมาจากความแตกต่างของแรงดันภายในและภายนอกเซลล์มีค่าไม่มาก เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้น้อยทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่ากรด-เบสต่ำกว่าเทคนิคอื่น ขณะที่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้มีค่าสูง

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชันที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Trusinska *et al.* (2024) ศึกษาการใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์ร่วมกับสภาวะสุญญากาศในตัวอย่างแอปเปิล พบว่าค่าความสว่างของสีลดลงมากกว่าการใช้สภาวะสุญญากาศเพียงอย่างเดียว และตัวอย่างสด การเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงเมื่อใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์เป็นผลมาจากการเกิดฟองอากาศทำให้โครงสร้างเนื้อเยื่อของมะม่วงเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้คลื่นอัลตราซาวนด์ยังทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ที่เป็นสาเหตุในการเกิดสารประกอบสีน้ำตาลนำไปสู่การแตกตัวของรงควัตถุที่ให้สี (Aadil *et al.*, 2013) สีของมะม่วงเกิดจากรงควัตถุแคโรทีนอยด์ โครงสร้างของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugated double bond) จำนวนมากจึงถูกออกซิไดซ์และสลายตัวได้ง่ายเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้สีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพลดลง (Moreira *et al.*, 2018) ขณะที่การใช้สภาวะสุญญากาศเกิดการแทนที่ของอากาศบางส่วนภายในโครงสร้างผลไม้ด้วยสารละลายที่ใช้ในการแช่ทำให้โครงสร้าง และค่าดัชนี

การหักเหของแสง (refractive index) เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อค่าสีของผลไม้ผ่านกระบวนการออกซิโมซิส (Trusinska *et al.*, 2024)

4. คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการออกซิโมติกดีไฮเดรชันด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

การใช้เทคนิค USVOD มะม่วงมีปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สูง เนื่องจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ช่วยในการสกัดแคโรทีนอยด์จากเนื้อเยื่อมะม่วงได้มากขึ้น ขณะที่การใช้สภาวะสุญญากาศร่วมด้วยมีกำจัดอากาศภายในเซลล์มะม่วงช่วยลดการเกิดออกซิเดชันอันเป็นสาเหตุในการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ ส่งเสริมให้แคโรทีนอยด์ที่อยู่ภายในเซลล์ผลไม้ถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นในกระบวนการออกซิโมซิส (Corrêa *et al.*, 2016; de Jesus Junqueira *et al.*, 2018) แต่เมื่อใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์เพียงอย่างเดียวทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงมากกว่าการใช้สภาวะสุญญากาศร่วม อาจเนื่องมาจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ระยะเวลานานทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของแคโรทีนอยด์ที่มีความไม่อิมมิตัวสูงเกิดการสลายตัวหรือการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในเซลล์ภายใต้สภาวะที่มีความร้อน การลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอนไซม์ เมื่อเซลล์ผลไม้เกิดการช้ำ และฉีกขาดจากการบด หั่นหรือสับ เอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับซับสเตรท (substrate) พลังเซลล์ผลไม้ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์มากขึ้น ทำให้แคโรทีนอยด์สลายตัวเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน (Guiamba *et al.*, 2016)

มะม่วงที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค USVOD มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่สูง เนื่องจากการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ช่วยปรับปรุงความสามารถในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเนื้อเยื่อผลไม้ รวมทั้งโครงสร้างของผลไม้ อาจช่วยป้องกันการสลายตัวของสารฟีนอลิก แต่การใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้สารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัวได้เช่นกัน โดยเกิดสารประกอบที่มีออกซิเจนในโมเลกุล (reactive oxygen species, ROS) ระหว่างการเกิดฟองอากาศ เมื่อใช้เทคนิคดังกล่าวกับตัวอย่างแอปเปิล ใบบักชีฝรั่ง และน้ำเมล่อน (Mierzwa *et al.*, 2022) มีรายงานถึงการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้สารฟีนอลของแอปเปิล เบต้าแคโรทีนของแครอท และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำแคนตาลูปลดลง (Nowacka *et al.*, 2017) ขณะที่ Rahaman *et al.* (2019) ศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ร่วมกับกระบวนการออกซิโมซิส พบว่าพลัมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น และ Trusinska *et al.* (2024) ศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ร่วมกับสภาวะสุญญากาศ พบว่าแอปเปิลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระมีค่าไม่แตกต่างจากการใช้สภาวะสุญญากาศเพียงอย่างเดียว ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขึ้นมะม่วงหลังจากผ่านกระบวนการออกซิโมซิสด้วยเทคนิคที่ต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่คงเหลือในมะม่วง เช่น แคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอลิก และกรดแอสคอร์บิก เป็นต้น

Conclusions

การใช้เทคนิคอัลตราซาวนด์ร่วมกับสภาวะสุญญากาศในการออกซิโมติกดีไฮเดรชัน (USVOD) ช่วยปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสารของขึ้นมะม่วง โดยเพิ่มปริมาณน้ำที่สูญเสีย และของแข็งที่เพิ่มขึ้นได้มากกว่าการใช้เทคนิค OD, VOD และ USOD ทุกช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ขณะที่ปริมาณน้ำหนักที่ลดลงมีค่าต่ำสุดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการออกซิโมซิส สำหรับปริมาณความชื้นและกิจกรรมของน้ำอิสระลดลงมากที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 41.70 และ 0.8773 ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้

เทคนิค USVOD ยังทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่ากรด-เบส ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด และสารประกอบฟีนอลิกรวมมีค่าสูงสุด แต่มีค่า ΔE ต่ำสุด สรุปได้ว่าการใช้เทคนิค USVOD สามารถประยุกต์ใช้ในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้ง ช่วยรักษาคุณภาพและคงคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์มะม่วงได้

Acknowledgments

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประจำปีงบประมาณ 2566 และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- Aadil, R. M., Zeng, X. A., Han, Z., & Sun, D. W. (2013). Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. *Food Chemistry*, 141, 3201-3206.
- AOAC, International. (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (17thed). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Atarés, L., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2008). Effect of solute on osmotic dehydration and rehydration of vacuum impregnated apple cylinders (cv. Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 89, 49-56.
- Corrêa, J. L. G., Ernesto, D. B., & Mendonça, K. S. (2016). Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT- Food Science and Technology*, 71, 17-24.
- Corrêa, J.L.G., Pereira, L.M., Vieira, G.S., & Hubinger, M.D. (2010). Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering*, 96, 498-504.
- de Jesus Junqueira, J.R., Corrêa, J.L.G., de Mendonça, K.S., de Mello Júnior, R.E., & de Souza, A.U. (2018). Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1863-1875.

- de Medeiros, R. A.B., da Silva Júnior, E.V., Barros, Z.M.P., & da Silva, J.H.F. (2022). Convective drying of mango enriched with phenolic compounds from grape residue flour under different impregnation methods. *Food Research International*, 158, 111539.
- Fernandes, F.A.N., Braga, T.R., Silva, E.O., & Rodrigues, S. (2019). Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1793-1800.
- Fernandes, F.A.N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.
- Ferrari, C.C. Arballo, J.R., Mascheroni, R.H., & Hubinger, M.D. (2011). Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 436-443.
- Gautam, S., Kathuria, D., Hamid., Dobhal, A., & Singh, N. (2024). Vacuum impregnation: Effect on food quality, application and use of novel techniques for improving its efficiency. *Food Chemistry*, 460, 140729.
- Goula, A. M., Kokolaki, M., & Daftsiou, E. (2017). Use of ultrasound for osmotic dehydration. The case of potatoes. *Food and Bioproducts Processing*, 105, 157-170.
- Guiamba, I., Ahrné, L., Khan, M. A. M., & Svanberg, U. (2016). Retention of β -carotene and vitamin C in dried mango osmotically pretreated with osmotic solutions containing calcium or ascorbic acid. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 320-326.
- Gupta, A. K., Gurjar, P.S., Beer, K., Pongener, A., Ravi, S.C., Singh, S., Verma, A., Singh, A., Thakur, M., Tripathy., S., & Verma, D.K. (2022). A review on valorization of different byproducts of mango (*Mangifera indica* L.) for functional food and human health. *Food Bioscience*, 48, 101783.
- Lee, H. S., & Castle, W. S. (2001). Seasonal changes of carotenoid pigments and color in Hamlin, Earlygold, and Budd Blood orange juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 877-882.

- Li, X., Bi, J., Chen, Q., Jin, X., Wu, X., & Zhou, M. (2019). Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC). *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie- Food Science and Technology*, 101, 351-359.
- Loypimai, P., Moongngam, A., & Chotthanom, P. (2009). Effects of ohmic heating on lipase activity bioactive compounds and antioxidant activity of rice bran. *Australian Journal of Basic and Applied Science*, 3, 3642-3652.
- Loypimai, P., Sinsiri, N., & Sinsiri, W. (2010). Antioxidant activity and total phenolics in Sugarcane (*Saccharum officinarum* "KhonKaen 1") juice. *Agricultural Science*, 41(1), 126-129.
- Ma, Y., Yi, J., Bi, J., Zhao, Y., Li, X., Wu, X., & Du, Q. (2021). Effect of ultrasound on mass transfer kinetics and phenolic compounds of apple cubes during osmotic dehydration. *LWT- Food Science and Technology*, 151, 112186.
- Mierzwa, D., Szadzińska, J., Gapiński, B., Radziejewska-Kubzdela, E., & Biegańska-Marecik, R. (2022). Assessment of ultrasound-assisted vacuum impregnation as a method for modifying cranberries' quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 89, 106117.
- Moreira, M.S., de Almeida Paula, D., Martins, E.M.F., Vieira, E.N.R., Ramos, A.M., & Stringheta, P.C. (2018). Vacuum impregnation of β -carotene and lutein in minimally processed fruit salad. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42, e13545.
- Naknean, P., Maneyam, R., & Kam-onsri, A. (2013). Effect of different osmotic agents on the physical, chemical and sensory properties of osmo-dried cantaloupe. *Chiang Mai Journal of Science*, 40(3), 427-439.
- Nowacka, M., Fijalkowska, A., Wiktor, A., Dadan, M., Tylewicz, U., Dalla Rosa, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2017). Influence of power ultrasound on the main quality properties and cell viability of osmotic dehydrated cranberries. *Ultrasonics*, 83, 33-41.

- Nowacka, M., Tylewicz, U., Romani, S., Rosa Dalla, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2017). Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 71-78.
- Radziejewska-Kubzdela, E., Szadzińska, J., Biegańska-Marecik, R., Spizewski, T., & Mierzwa, D. (2023). Effect of ultrasound on mass transfer during vacuum impregnation and selected quality parameters of products: A case study of carrots. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99, 106592.
- Rahaman, A., Zeng, X.A., Kumari, A., Rafiq, M., Siddeeg, A., Manzoor, M.F., Baloch, Z., & Ahmed, Z. (2019). Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104643.
- Rana, A., Dhiman, A., Kumar, S., Suhag, R., & Saini, R. (2024). Osmosonication for dehydration of fruits and vegetables: Mechanistic understanding, mathematical models and comprehensive applications in processing. *Trends in Food Science & Technology*, 152, 104688.
- Sharma, M., & Dash, K. K. (2019). Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104693.
- Sulistiyawati, I., Dekker, M., Fogliano, V., & Verkerk, R. (2018). Osmotic dehydration of mango: Effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. *LWT-Food Science and Technology*, 98, 179 -186.
- Trusinska, M., Rybak, K., Drudi, F., Tylewicz, U., & Nowacka, M. (2024). Combined effect of ultrasound and vacuum impregnation for the modification of apple tissue enriched with aloe vera juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 104, 106812.
- Xu, B., Zhang, M., Bhandari, B., & Cheng, X. (2014). Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration and freezing on the water state, cell structure, and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) cylinders. *Drying Technology*, 32(15), 1803-1811.
- Zou, K., Teng, J., Huang, L., Dai, X., & Wei, B. (2013). Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. *LWT - Food Science and Technology*, 51, 253-259.